

PENGGUNAAN MESIN CNC UNTUK MENGATASI LIMBAH B3 (BAHAN BERACUN DAN BERBAHAYA) DALAM PROSES PEMBUATAN PCB

Dian Ariyanto

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Indonesia ; Jalan kaliurang km 14.5, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta

Keywords:

PCB,
CNC,
Etching,
Limbah B3

Correspondent Email:

125202501@uii.ac.id

Abstrak. PCB atau *Printed Circuit Board* adalah papan yang digunakan untuk menghubungkan komponen-komponen elektronika melalui jalur tembaga yang di desain sesuai dengan rangkaian serta mempunyai tujuan keamanan, mengurangi penggunaan kabel dan membuat jalur listrik yang efisien. Proses pembuatan PCB menimbulkan limbah yang dapat dikategorikan merupakan limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya) yaitu larutan asam ferric klorida yang digunakan pada saat proses etching. Larutan larutan asam ferric klorida memiliki sifat beracun, korosif, bersifat isirasi dan dapat mencemari lingkungan yang merupakan beberapa kriteria dari limbah B3. Karena hal inilah penulis ingin meneliti penggunaan mesin CNC untuk membuat PCB sebagai metode untuk mengatasi limbah B3 yang dihasilkan pada saat proses pembuatan PCB menggunakan metode konvensional (sablon dan etching). Tahapan penelitian ini terdiri dari Studi literatur, penyusunan langkah kerja, Uji Coba dan Evaluasi serta Analisa. Hasil dari penelitian ini diperoleh pembuatan PCB menggunakan CNC menghasilkan limbah berupa serbuk kertas dan serpihan tembaga yang bukan merupakan limbah B3. Penanganan limbah serbuk kertas dan tembaga dapat menggunakan vakum cleaner ataupun kuas. Selain itu pembuatan PCB menggunakan CNC mempunyai batasan lebar jalur yang bisa dibuat minimal pada 0,2mm.

Abstract. PCB or *Printed Circuit Board* is a board used to connect electronic components through copper lines that are designed according to the circuit and have the purpose of safety, reducing cable usage and creating efficient electrical lines. The PCB manufacturing process produces waste that can be categorized as B3 waste (toxic and hazardous materials), namely ferric chloride acid solution used during the etching process. Ferric chloride acid solutions are toxic, corrosive, corrosive and can pollute the environment, which are some of the criteria for B3 waste. Because of this, the author wants to research the use of CNC machines to make PCBs as a method to overcome B3 waste produced during the PCB manufacturing process using conventional methods (screen printing and etching). The stages of this research consist of Literature Study, preparation of work steps, Trial and Evaluation and Analysis. The results of this study obtained that making PCBs using CNC produces waste in the form of paper dust and copper flakes which are not B3 waste. Handling of paper and copper powder waste can use a vacuum cleaner or brush. In addition, making PCBs using CNC has a track width limitation that can be made at least 0.2mm.

1. PENDAHULUAN

PCB atau *Printed Circuit Board* merupakan sebuah papan yang digunakan pada peralatan elektronika untuk menghubungkan komponen-komponen elektronika melalui jalur tembaga yang di desain sesuai dengan rangkaian serta mempunyai tujuan keamanan, mengurangi penggunaan kabel dan membuat jalur listrik yang efisien[1]. PCB terdiri dari beberapa lapisan yaitu lapisan soldermask, lapisan tembaga dan substrat. Pembuatan PCB hingga dapat digunakan melalui beberapa tahapan yaitu desain jalur, pemotongan PCB, penyablonan(pelapisan), proses etching, pembersihan dan pengeboran[2]. Tahapan desain jalur menggunakan software desain PCB seperti Diptrace, Eagle, EasyEDA dan masih banyak lainnya. Setelah desain PCB jadi kemudian desain dicetak pada kertas khusus yang nantinya akan disablonkan atau dilapiskan pada PCB polos.

Proses selanjutnya adalah proses etching atau proses pengikisan lapisan tembaga menggunakan bahan kimia yaitu ferric klorida (FeCl_3) yang dilarutkan pada air sehingga menjadi larutan asam ferric klorida[3]. Setelah lapisan tembaga yang tidak terlapis larut dan membentuk suatu jalur atau desain kemudian PCB akan dibersihkan untuk menghilangkan lapisan tinta. Tahapan berikutnya adalah pengeboran PCB sesuai dengan desain yang digunakan untuk menaruh kaki-kaki komponen elektronika sehingga PCB siap digunakan.

Proses pembuatan PCB secara konvensional menimbulkan limbah yang dapat dikategorikan merupakan limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya) yaitu larutan asam ferric klorida. Larutan asam ferric klorida memiliki sifat beracun, korosif, bersifat iritasi dan dapat mencemari lingkungan yang merupakan beberapa kriteria dari limbah B3[4][5]. Limbah larutan asam ferric klorida memerlukan penanganan khusus untuk pembuangan limbah, hal ini dikarenakan larutan ini bersifat korosif dan dapat menyebabkan pencemaran lingkungan jika dibuang sembarangan. Karena hal inilah penulis ingin meneliti penggunaan mesin CNC untuk membuat PCB sebagai metode untuk mengatasi limbah B3 yang dihasilkan pada saat proses pembuatan PCB menggunakan metode konvensional (sablon dan etching).

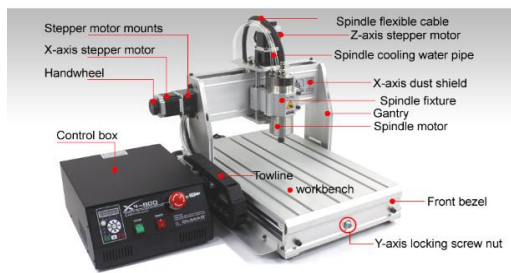
Mesin CNC atau *Computer Numerical Control* adalah perangkat mesin manufaktur yang mengontrol pergerakan dan pengoperasian nya dilakukan oleh komputer dengan tujuan untuk memperoleh hasil yang produk dengan presisi yang tinggi[6]. Nantinya desain dari pcb akan diproses menggunakan software *computer-aided manufacturing* (CAM)[7] seperti CopperCAM atau CircuitCAM. Software ini nantinya dapat mengubah desain PCB menjadi perintah mesin (G-Code)[8] yang digunakan untuk mengoperasikan mesin CNC. Sehingga nantinya mesin CNC dapat bekerja secara otomatis mencetak / mengukir lapisan tembaga PCB sesuai dengan desain yang dibuat.

Diharapkan dengan penggunaan mesin CNC nantinya limbah yang dihasilkan oleh prose pembuatan PCB merupakan limbah yang aman dan bukan termasuk limbah B3. Sehingga dengan mesin CNC dapat mengatasi limbah larutan asam ferric klorida yang dihasilkan pada saat pembuatan PCB secara konvensional. Selain itu pembuatan PCB secara konvensional yang melalui tahapan pemotongan, penyablonan, proses etching dan pengeboran dapat dikerjakan oleh mesin CNC sehingga waktu pengerjaan pembuatan PCB akan lebih cepat serta memiliki presisi yang tinggi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin CNC

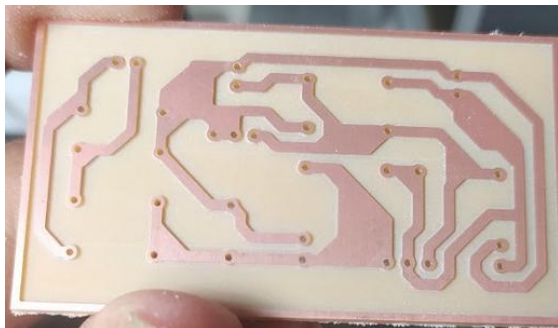
CNC atau *Computer Numerical Control* adalah perangkat mesin manufaktur yang mengontrol pergerakan dan pengoperasian nya dilakukan oleh komputer dengan tujuan untuk memperoleh hasil yang produk dengan presisi yang tinggi.[9] Mesin CNC terdiri dari tiga bagian yaitu Mesin CNC, Pengontrol CNC dan Perangkat lunak CAD/CAM.[10] Mesin CNC adalah perangkat keras fisik yang digunakan untuk melakukan operasi permesinan yang terdiri dari motor, driver, spindle, pemegang alat dan alat pemotong. Keunggulan penggunaan mesin CNC adalah presisi dan akurasi yang sangat baik, Efisiensi dalam produktivitas mengurangi pemborosan dan mengurangi kesalahan pengoperasian.



Gambar 1. Mesin CNC OMIOCNC X4-800L

2.2. PCB

PCB atau *Printed Circuit Board* merupakan suatu papan yang digunakan untuk menghubungkan komponen - komponen elektronika dengan menggunakan jalur konduktor berupa tembaga.[11] PCB pada umumnya memiliki beberapa lapisan yaitu Soldermask, lapisan tembaga dan substrat. Soldermask merupakan lapisan paling atas dalam suatu PCB yang berfungsi untuk melindungi lapisan tembaga dari hubung singkat yang tidak disengaja. Lapisan tembaga yang berfungsi sebagai lapisan konduktor yang digunakan untuk menghubungkan kaki-kaki komponen ataupun konektor. Bagian ketiga adalah substrat atau bahan utama pembuat PCB. Substrat paling umum terbuat dari material FR2. FR 2 atau *Fire Retardant 2* adalah material kertas katun yang dicampur dengan resin plastik formaldehida fenol (*plasticized phenol formaldehyde resin*) kemudian di cetak menjadi papan kertas.[12] Keunggulan material FR2 adalah memiliki ketahanan terhadap panas, ketahanan terhadap kelembapan, dan biaya pembuatan yang relative murah.



Gambar 2. PCB

2.3. Proses Etching

Etching atau etsa merupakan suatu metode pengikisan bahan logam dengan cara merendam ke dalam larutan asam kuat. Dalam proses pembuatan PCB proses etching bahan logam yang dikikis adalah lapisan tembaga. Proses etching pcb yang sering digunakan adalah menggunakan cairan FeCl_3 atau Ferriclorida. Ferriclorida merupakan senyawa kimia yang bersifat asam, sangat korosif serta dapat menghasilkan gas dan panas saat dicampur dengan air.[13] Penggunaan cairan Ferriclorida pada proses etching adalah PCB yang telah dilapisi dengan lapisan sablon/ tinta akan dimasukan kedalam larutan Ferriclorida kemudian lapisan tembaga dari pcb yang tidak terlapisi akan terkikis sehingga akan didapatkan jalur tembaga sesuai yang diinginkan.



Gambar 3. Proses etching PCB

2.4. Limbah B3 (Bahan Beracun dan Berbahaya)

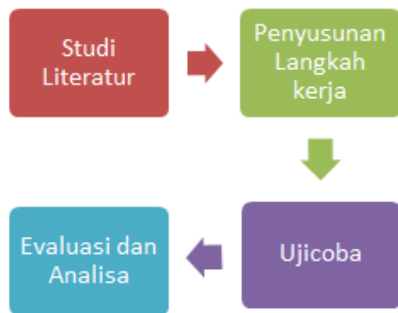
Limbah B3(bahan beracun dan berbahaya) merupakan suatu buangan atau limbah yang sifat dan konsentrasi zat yang terkandung memiliki racun dan berbahaya sehingga secara langsung atau tidak langsung dapat merusak lingkungan, mengganggu kesehatan dan mengancam kelangsungan hidup. Beberapa kriteria limbah B3 diantaranya mudah meledak, mudah menyala, beracun, berbahaya, korosif, bersifat iritasi dan berbahaya bagi lingkungan.[14]



Gambar 4. Simbol Limbah B3

3. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian Penggunaan mesin CNC untuk mengatasi limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya) dalam proses pembuatan PCB memiliki beberapa tahapan yaitu studi literatur, penyusunan langkah kerja, ujicoba dan evaluasi serta analisa.

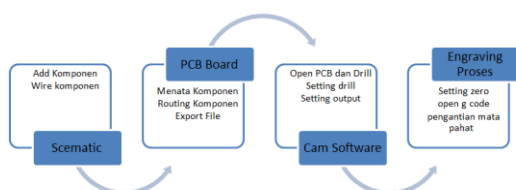


Gambar 5. Metode Penelitian

3.1. Studi literature

Tahapan pertama adalah studi literatur yaitu pengumpulan berbagai materi baik itu buku, penelitian-penelitian yang terkait dengan CNC dan pcb, mengumpulkan video tutorial dan materi mengenai limbah B3 (bahan beracun dan berbahaya). Bagian-bagian CNC perlu pelajari terlebih dahulu agar kita paham cara kerja dari mesin CNC serta tahapan yang harus kita lakukan untuk membuat PCB menggunakan mesin CNC.

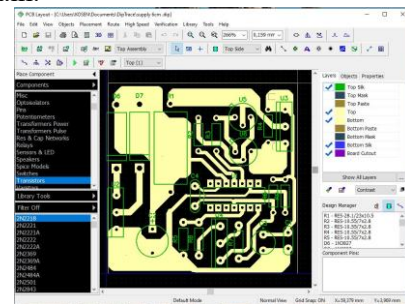
3.2. Penyusunan langkah kerja pembuatan PCB menggunakan CNC



Gambar 6. Tahapan pembuatan PCB menggunakan CNC

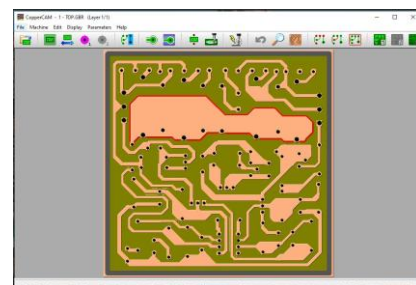
Tahapan Pembuatan PCB menggunakan CNC terdiri dari empat tahapan yaitu skema pcb, PCB board, CAM software dan CNC proses. Proses pembuatan skema rangkaian pcb dan pcb board menggunakan software DipTrace version 2.4.0.2. Tahapan pembuatan Skematik pcb terdiri dari proses penambahan

komponen, penyusunan komponen dan pembuatan jalur sesuai dengan rangkaian yang akan dibuat. Setelah skematik PCB jadi kemudian akan masuk pada tahapan pembuatan PCB board untuk menata dan membuat jalur antar komponen. Serta menentukan lebar jalur PCB dan lebar lubang dari PCB. Setelah PCB siap kemudian file desain pcb disimpan menjadi file gerber. File Gerber adalah format file gambar vektor 2D standar industri yang digunakan untuk memuat informasi mengenai papan sirkuit cetak (PCB). File ini berisi data tentang setiap lapisan PCB, seperti lapisan tembaga, lapisan solder, dan lain-lain.



Gambar 7. Pembuatan desain PCB menggunakan DipTrace

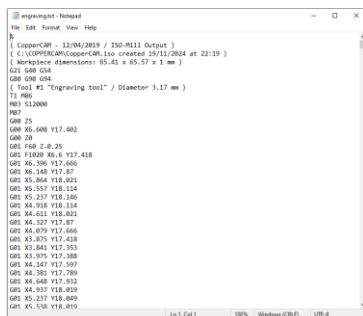
Desain skematik dan papan PCB yang telah dibuat harus diubah menjadi file geber (gbr) yang nantinya akan diproses oleh software CAM. CAM atau *Computer-Aided manufacturing* adalah perangkat lunak yang digunakan untuk mengubah desain PCB board yang kita buat menggunakan software PCB design menjadi program mesin berupa atau sering disebut G-code file. Software CAM yang digunakan untuk mengubah file gerber menjadi G-code adalah CopperCAM. CopperCAM mempunyai keunggulan dalam hal kemudahan penggunaan, setting kecepatan gerak CNC, kecepatan pengeboran dan mata pahat yang akan digunakan.



Gambar 8. Proses pembuatan PCB dengan software copperCAM

Proses pembuatan PCB menggunakan software copperCAM nantinya akan menghasilkan file G-Code yang terdiri dari tiga tahapan kerja yaitu proses pengeboran, proses pengukiran dan proses pemotongan. Ketiga proses ini dibedakan oleh mata pahat yang akan digunakan pada CNC. Mata pahat merupakan bagian dari CNC yang akan digunakan untuk mengebor PCB, mengukir PCB dan memotong PCB. Mata Pahat yang digunakan untuk mengebor atau sering disebut drill bit memiliki ukuran diameter 1mm serta digunakan khusus untuk membuat lubang

Mata pahat yang digunakan untuk mengukir atau sering disebut dengan engraving bit endmill dirancang untuk mengikis permukaan dari PCB dengan kedalaman 0.25mm sesuai dengan rancangan yang telah dibuat, mata pahat untuk mengukir menggunakan diameter 0.8mm. Kemudian untuk proses pemotongan PCB menggunakan engraving endmill dengan diameter yang lebih besar yaitu 2 mm dengan kedalaman 1.8 mm. Kecepatan dari CNC diatur pada 12000rpm hal ini dikarenakan PCB termasuk bahan lunak sehingga kecepatan putar mesin CNC cukup pada kecepatan antara 10.000 rpm – 13.000 rpm.



Gambar 9. File G-code

Output dari software CopperCAM nantinya akan terdiri dari tiga file G-code mewakili fungsi pengeboran, pengukiran dan pemotongan. Hal ini dilakukan karena software CNC Engraving hanya dapat membaca file G-code. File G-Code merupakan file pemrograman yang digunakan untuk mengontrol mesin CNC yang terdiri dari perintah-perintah yang mendefinisikan gerakan dari mesin CNC. Perintah ini dapat berupa perintah untuk menggerakkan sumbu X, Y, atau Z, mengatur kecepatan alat, atau mengaktifkan fungsi tertentu, seperti menyalakan spindle[15].

File G-code kemudian akan dibaca oleh software Mach3 Mill yang telah terhubung dengan mesin CNC. Untuk mengontrol mesin CNC dibutuhkan sebuah komputer yang telah terinstal software mach3 Mill serta terhubung dengan mesin CNC, mach3 mill akan membaca file G-Code kemudian akan mengartikan perintah-perintah tersebut untuk menggerakkan mesin CNC sesuai dengan koordinat-koordinat dan perintah yang dihasilkan oleh software copperCAM.

Mesin CNC yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan CNC dengan merk OMIOCNC dengan seri X4-800L. CNC ini mempunyai spesifikasi seperti pada tabel berikut.

Tabel 1. Spesifikasi CNC OMIOCNC X4-800L

Detail alat	Spesifikasi
Area kerja	(X)270×(Y)390×(Z)105mm
Bahan	Hard aluminum alloy
Kecepatan motor	6000~24000 rpm/min
Daya	800W
Akurasi	0,05mm
Feed rate	300~5000 mm/min

Pengaturan mesin CNC untuk pembuatan PCB menggunakan kecepatan Spindle pada 12000 rpm hal ini dikarenakan bahan pembuatan PCB terdiri dari material FR2 yang mempunyai kekerasan yang sedang sehingga tidak memerlukan kecepatan yang cukup tinggi. Dengan area kerja maksimal pada 270x390mm mesin CNC ini sangat cukup untuk pembuatan PCB hal ini dikarenakan dipasaran ukuran PCB polos berkisar pada ukuran 100x200mm.

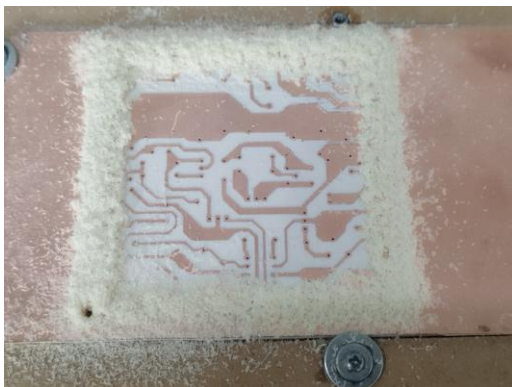


Gambar 10. Proses pembuatan PCB

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Limbah hasil pembuatan PCB

Limbah hasil pembuatan PCB menggunakan CNC terdiri dari serbuk bahan pembuat PCB yang merupakan material FR2 dan serpihan tembaga. Material FR2 (*Fire Retardant 2*) merupakan material yang disusun dari material kertas katun dan resin sehingga serbuk hasil pembuatan PCB menggunakan CNC merupakan bahan yang aman atau bukan termasuk limbah bahan beracun dan berbahaya. Hal ini dapat dilihat dari serbuk limbah yang tidak menimbulkan korosi, tidak beracun, tidak menimbulkan iritasi pada kulit serta tidak mudah terbakar. Penanganan limbah hasil pembuatan PCB menggunakan CNC juga tanpa memerlukan metode khusus, limbah serbuk dapat dihisap menggunakan vacuum cleaner ataupun menggunakan kuas halus kemudian dibuang ketempat sampah. Sehingga metode pembuatan PCB menggunakan CNC dapat mengatasi limbah B3 yang biasanya dihasilkan pada saat pembuatan PCB menggunakan metode etching dengan cairan FeCl_3 atau Ferri Klorida untuk melarutkan lapisan tembaga pada PCB.



Gambar 11. PCB dan Limbah hasil pembuatan

4.2. Pengujian lebar jalur PCB

Pengujian lebar jalur PCB bertujuan untuk mengetahui lebar jalur minimal yang dapat dibuat oleh mesin CNC. Jalur PCB atau sering menggunakan istilah trace PCB adalah jalur konduktif tipis pada papan sirkuit cetak (PCB) yang digunakan untuk menghubungkan komponen elektronik. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui batasan lebar jalur yang

dapat dibuat oleh mesin CNC. Dari hasil pengujian ini diperoleh dapat seperti pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian lebar jalur PCB

Lebar Jalur (mm)	Hasil Ujicoba
0,10	Jalur terputus
0,20	Berhasil
0,30	Berhasil
0,40	Berhasil
0,50	Berhasil
0,60	Berhasil
0,70	Berhasil
0,80	Berhasil
0,90	Berhasil
1,00	Berhasil
1,25	Berhasil
1,50	Berhasil

Pengujian lebar jalur PCB dibuat pcb dengan desain jalur PCB yang terdiri dari 12 macam lebar jalur mulai dari 0.1 mm sampai 1.5 mm. Dari hasil pengujian seperti pada gambar 12 diperoleh hasil bahwa mesin CNC mampu digunakan pada lebar jalur minimal 0.2 mm. Pada jalur PCB dengan lebar 0.1 mm didapatkan jalur pcb terputus pada bagian tengah.



Gambar 12. PCB pengujian lebar jalur

4.3. Pengujian Kecepatan pembuatan PCB

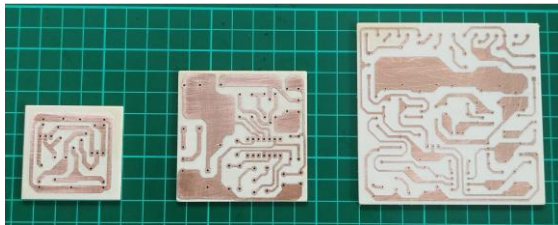
Pengujian tambahan yang dilakukan adalah pengujian kecepatan pembuatan PCB dengan menggunakan mesin CNC. Pada pengujian ini dilakukan dengan tiga desain pcb yang memiliki ukuran yang berbeda. Pertama adalah pcb rangkaian Flip-Flop dengan ukuran 4x4cm, yang kedua adalah PCB power supply dengan ukuran 6x6 cm dan yang ketiga adalah PCB power amplifier dengan ukuran 8,5x8,5 cm. Pada pembuatan ke tiga jenis PCB ini

menggunakan pengaturan kecepatan gerak mesin CNC pada 17mm/s. Dari pengujian ini diperoleh hasil seperti pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kecepatan Pembuatan PCB

Ukuran PCB	Pengeboran (detik)	Pengukiran (detik)	Pemotongan (detik)
4x4cm	108	513	27
6x6cm	227	840	33
8,5x8,5 cm	212	1184	42

PCB pertama dengan ukuran 4x4cm membutuhkan waktu pengeboran 108 detik, pengukiran 513 detik dan pemotongan 27 detik dengan total waktu 648 detik atau 10 menit 48 detik. PCB kedua dengan ukuran 6x6cm membutuhkan waktu pengeboran 227 detik, pengukiran 480 detik dan pemotongan 33 detik dengan total waktu 1100 detik atau 18 menit 20 detik. PCB ketiga dengan ukuran 8,5x8,5cm membutuhkan waktu pengeboran 212 detik, pengukiran 1184 detik dan pemotongan 42 detik dengan total waktu 1438 detik atau 23 menit 58 detik.



Gambar 13. PCB hasil uji coba kecepatan

Hasil Pengujian kecepatan pembuatan PCB dengan contoh tiga ukuran diperoleh waktu pembuatan PCB yang dibagi menjadi tiga tahapan yaitu proses pengeboran, pengukiran dan pemotongan. Untuk waktu pengeboran PCB waktu yang diperlukan tidak tergantung dengan ukuran PCB tapi tergantung dengan jumlah lubang. Sedangkan waktu pengukiran dan pemotongan PCB semakin luas ukuran PCB maka waktu yang diperlukan akan semakin lama.

5. KESIMPULAN

- a. Limbah hasil pembuatan PCB menggunakan mesin CNC berupa serbuk material pembuat PCB yaitu FR2 yang merupakan bahan campuran kertas dan resin serta serbuk lapisan tembaga. Serbuk kertas dan tembaga merupakan material

limbah yang tidak termasuk dalam limbah B3. Limbah serbuk kertas dan tembaga dapat dibersihkan dengan menggunakan vakum cleaner atau menggunakan kuas.

- b. Hasil Pengujian pembuatan PCB menggunakan CNC diperoleh lebar jalur PCB minimal adalah 0.2mm.
- c. Hasil ujicoba pembuatan PCB dengan tiga contoh ukuran yang berbeda dengan pengaturan kecepatan di 17mm/s diperoleh untuk PCB dengan ukuran 4x4cm membutuhkan waktu 10 menit 48 detik, ukuran 6x6cm membutuhkan waktu atau 18 menit 20 detik dan untuk PCB dengan ukuran 8,5x8,5cm membutuhkan waktu 23 menit 58 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih diberikan kepada jurusan teknik elektro, Universitas Islam Indonesia atas semua dukungan dan pembiayaan sehingga penelitian ini dapat dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Prasetyo, J. Jamaaluddin, and I. Anshory, "PCB (Printed Circuit Board) Etching Machine Using ESP32-Camera Based Internet Of Things," *J. JEETech*, vol. 4, no. 2, pp. 139–148, 2023, doi: 10.32492/jeetech.v4i2.4208.
- [2] M. More, P. Makwana, P. Nakrani, S. Kele, and P. Shete, "Design and Manufacturing of a Pcb Cutting Machine," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, no. June, pp. 1535–1542, 2020, [Online]. Available: www.irjet.net
- [3] L. Lidiawati, "Reduksi Kadar Tembaga (Cu) pada Limbah Cair Proses Etching PCB di Laboratorium Fisika Menggunakan Metode Elektrolisis," vol. 7, no. 1, 2025.
- [4] M. A. R. Sutisna, "Pencemaran limbah printed circuit board dari kegiatan kelistrikan PLN," *Humans Chem. Regimes*, vol. 1, no. 1, pp. 15–23, 2024, doi: 10.61511/hcr.v1i1.639.
- [5] M. Veronika Tarihoran, Tamaji, and Y. Alif Kurnia, "Mesin Etching PCB (Printed Circuit Board) Menggunakan Arduino Nano," *Semin. Nas. Ilmu Terap.* 2019, pp. 1–4, 2019.
- [6] E. S. Syahfitri, "Rancang Bangun Mesin CNC (Computer Numerical Control) Berbasis Mikrokontroler," *Deli Sains Inform.*, vol. 1, no. 2, 2022, [Online].
- [7] A. Muchlis, W. Ridwan, and I. Z. Nasibu, "Rancang Bangun Mesin CNC (Computer Numerical Control) Laser dengan Metode

- Design for Assembly,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 23–27, 2021, doi: 10.37905/jjee.v3i1.9228.
- [8] M. Jufrizaldy, I. Ilyas, and M. Marzuki, “Rancang Bangun Mesin CNC Milling Menggunakan System Kontrol Grbl Untuk Pembuatan Layout Pcb,” *J. Mesin Sains Terap.*, vol. 4, no. 1, p. 37, 2020, doi: 10.30811/jmst.v4i1.1743.
- [9] M. S. Bin Islam, M. Shaikhul Hasib, M. Shakhawat Hossen, S. M. Tareq Aziz, and M. Rokunuzzaman, “Design and Implementation of a CoreXY CNC Milling Machine for PCB Manufacturing Application,” *SSRN Electron. J.*, no. December, pp. 1–7, 2024, doi: 10.2139/ssrn.4860937.
- [10] D. Sundhara Raja and N. viswa, “Implementation of PCB Layout using CNC Machine Controlling with Wireless Communication,” *Int. Res. J. Innov. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 3, pp. 22–27, 2020, [Online]. Available: www.irjiet.com
- [11] M. T. Khatun *et al.*, “Study of CNC System for PCB Design using Proteus,” *Int. J. Adv. Trends Comput. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 101–105, 2021, doi: 10.30534/ijatcse/2021/141012021.
- [12] A. Y. Wirapraja, H. B. Cahyono, and M. M. Ali, “Shielding Elektromagnetik Tembaga dari Proses Elektrolisis Air Limbah Industri Printed Circuit Board,” *J. Teknol. Bahan dan Barang Tek.*, vol. 10, no. 1, p. 9, 2020, doi: 10.37209/jtbbt.v10i1.162.
- [13] C. T. Obe, S. E. Oti, C. U. Eya, D. B. N. Nnadi, and O. E. Nnadi, “A low-cost printed circuit board design technique and processes using ferric chloride solution,” *Niger. J. Technol.*, vol. 39, no. 4, pp. 1223–1231, 2021, doi: 10.4314/njt.v39i4.31.
- [14] E. Azhari, R. Suppa, and M. Mukramin, “Rancang Bangun Pemilah Sampah Logam Dan Non Logam Otomatis,” *J. Inform. dan Tek. Elektro Terap.*, vol. 12, no. 3, 2024, doi: 10.23960/jitet.v12i3.4721.
- [15] M. Ichwan, N. Mulyono, F. Ariefka, and S. Putra, “Rancang Bangun Mesin Pengukir Jalur PCB Menggunakan Laser dan Raspberry Pi dengan Metode Kontrol Numerik,” *Pros. Semin. Nas. Teknol. Dan Risert Terap.*, p. 466, 2023.